



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## TESTOVÁNÍ IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

TESTING OF INSULATING SYSTEMS OF ELECTRICAL MACHINES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Procházka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Jan Procházka

**ID:** 173730

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Testování izolačních systémů elektrických strojů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Definujte požadované vlastnosti izolačních systémů elektrických strojů a postupy pro jejich testování.
2. Proveďte měření na předložených vzorcích izolačních systémů.
3. Vyhodnoťte provedená měření.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-70162-1.
- [2] STONE, Greg C., Ian CULBERT, Edward A. BOULTER a Hussein DHIRANI. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. Second edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley, 2014. ISBN 978-1-11-8057-063.
- [3] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 31.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

V této bakalářské práci jsou definovány základní požadované vlastnostmi izolačních systémů točivých elektrických strojů. Dále jsou uvedeny postupy pro jejich testování a výsledky provedených testů.

## **Klíčová slova**

Elektrický izolační systém; točivý elektrický stroj; elektrická pevnost; izolační materiál; dielektrické ztráty; průraz izolantu; rezistivita; permitivita; zkoušený předmět; zkouška odolnosti; diagnostický faktor.

## **Abstract**

This bachelor thesis defines basic required properties of insulation systems in rotating electric machines. The following are procedures for their testing and results of conducted tests.

## **Keywords**

Electrical insulation system; rotating electric machine; dielectric strength; insulating material; dielectric loss; insulation breakdown; resistivity; permittivity; tested subject; endurance test; diagnostic factor.

### **Bibliografická citace:**

PROCHÁZKA, J. Testování izolačních systémů elektrických strojů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D..

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Testování izolačních systémů elektrických strojů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího *bakalářské* práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **31. května 2017**

.....

podpis autora

## **Poděkování (nepovinné)**

V této sekci je možno uvést poděkování vedoucímu práce a těm, kteří poskytli odbornou pomoc (externí zadavatel, konzultant, apod.).

Děkuji vedoucímu *bakalářské* práce Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **31. května 2017**

.....  
podpis autora(-ky)

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Izolační materiály .....	2
2.1	Elektrická vodivost plynů .....	2
2.2	Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů .....	2
2.3	Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů .....	2
2.4	Dielektrické ztráty .....	3
2.5	Průraz izolantů .....	3
3	Tabulky izolačních materiálů .....	5
4	Požadavky na izolační systémy elektrických strojů, jejich funkce a jednotlivé typy .....	8
4.1	Funkce izolačních systémů .....	8
4.2	Vlastnosti izolačních materiálů .....	8
4.3	Statorové vinutí .....	9
4.3.1	Náhodně vinutá vinutí .....	9
4.4	Izolace vodičů .....	9
4.5	Izolace drážek .....	10
4.6	Impregnace strojů .....	11
4.7	Vzduchová mezera .....	12
5	Funkční hodnocení izolačních systémů .....	13
5.1	Faktory stárnutí .....	13
5.2	Funkční zkoušky .....	13
5.2.1	Tepelné funkční zkoušky .....	14
5.2.2	Analýza a klasifikace .....	15
5.2.3	Elektrické funkční zkoušky .....	15
5.2.4	Multifaktorové funkční zkoušky .....	15
5.3	Zkoušené předměty a zkušební vzorky .....	16
5.4	Zkušební postupy .....	16
5.4.1	Počáteční třídící zkoušky .....	17
5.4.2	Subcyklus tepelného stárnutí .....	18
5.4.3	Mechanické namáhání .....	18
5.4.4	Zkouška vlhkostí .....	19
5.4.5	Elektrická diagnostická zkouška .....	19
5.4.6	Doba trvání a počet subcyklů stárnutí .....	19
5.4.7	Kritéria koncového bodu .....	20
5.5	Metody ohřevu .....	20
6	Testování zařízení pro tepelné stárnutí .....	21
6.1	Měření průtoku vzduchu pecí .....	21

6.2	Měření rozdílů teplot v peci.....	21
7	Testování izolačních systémů statorů .....	23
7.1	Postup zkoušky.....	24
7.2	Subcyklus tepelného stárnutí .....	24
7.3	Diagnostický subcyklus .....	26
7.3.1	Subcyklus mechanického namáhání.....	26
7.3.2	Subcyklus elektrické diagnostické zkoušky .....	26
7.3.3	Vyhodnocení měření.....	26
8	Závěr .....	27
	Literatura .....	29
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	33
	Seznam příloh.....	34



## Seznam obrázků

Obr. 2.1 a) teplotní b) kmitočtová závislost ztrátového činitele nepochárního dielektrika [6] .....	3
Obr. 4.1 Vrstvy drážkové izolace [1] .....	10
Obr. 4.2 Drážková izolace [8] .....	11
Obr. 4.3 Impregnace statoru zakapávací metodou [9] .....	12
Obr. 5.1 Vývojový diagram zkoušky .....	18
Obr. 6.1 Rozmístění termočlánků v teplotní komoře .....	22
Obr. 6.2 Graf průběhu teploty měřené termočlánkem 2 v závislosti na čase .....	22
Obr. 7.1 Zkoušený předmět (stator) č.1 před zahájením zkoušek .....	23
Obr. 7.2 Zkoušený předmět (stator) č.2 před zahájením zkoušek .....	24
Obr. 7.3 Zkoušený předmět (stator) č.1 po provedení dvou cyklů zkoušky .....	25
Obr. 7.4 Zkoušený předmět (stator) č.2 po provedení dvou cyklů zkoušky .....	25

## Seznam tabulek

Tab. 3.1 Izolační materiály drážek a vinutí (1.část) .....	5
Tab. 3.2 Izolační materiály drážek a vinutí (2.část) .....	6
Tab. 3.3 Impregnační materiály .....	7
Tab. 5.1 Tepelné třídy [32] .....	14
Tab. 5.2 Elektrická diagnostická zkouška [37] .....	19
Tab. 5.3 Navrhované teploty a doby stárnutí pro předpokládané tepelné třídy [38] .....	20

# 1 ÚVOD

Jedním ze základních prvků důležitých pro funkci točivých elektrických strojů je jejich izolační systém tvořený několika různými typy izolací. Na vlastnosti těchto jednotlivých izolací jsou kladeny podmínky dané jejich účelem a umístěním. Izolace totiž musí odolávat různým nepříznivým vlivům, které na ni v elektrickém stroji působí. Mezi tyto vlivy patří běžně například teplota způsobená Joulovými ztrátami, mechanické namáhání vibracemi, působení elektrického pole, nebo působení klimatických podmínek.

Aby izolační systém splňoval požadavky je důležité hlavně z toho důvodu, že jeho životnost velmi často ovlivňuje celkovou životnost samotného stroje. To je způsobeno stárnutím izolačního systému kvůli působení nepříznivých vlivů.

Pro ověření, zda je izolační systém schopen pracovat v požadovaných podmínkách je třeba provést zkoušku odolnosti. Při této zkoušce je zkoušený předmět ať už se jedná o celý stroj, nebo pouze jeho část podroben zvýšenému působení nepříznivých vlivů. Nepříznivé vlivy, kterým by měl zkoušený předmět po určitou dobu odolávat jsou při zkoušce zesíleny pro urychlení průběhu zkoušky.

Tato práce se bude zabývat rozбором vlastností jednotlivých částí izolačních systémů a požadavky na ně kladenými. Dále zde budou shrnuty vybrané materiály používané v izolačních systémech a jejich vlastnosti. V následující části budou uvedeny postupy a požadavky na zkoušky izolačních systémů. A na závěr budou popsány postupy a výsledky provedených zkoušek na testovaných předmětech v podobě statorových vinutí.

## 2 IZOLAČNÍ MATERIÁLY

Primárním účelem izolačních materiálů je oddělení vodivých částí s různými elektrickými potenciály. Všechny izolanty jsou také dielektriky což znamená, že jsou schopny být polarizovány při působení elektrického pole. To znamená, že se elektricky vázané náboje přemístí ze svých rovnovážných poloh a dipólové molekuly se orientují ve směru pole s polaritou opačnou, než má působící pole. Tím je velikost působícího pole zmenšována. Míra polarizace je relativní permitivita a vektor polarizace. Relativní permitivita udává poměr intenzity elektrického pole vnějšího ku výslednému elektrickému poli. Polarizovatelnost je schopnost polarizace dielektrické látky, která souvisí s permitivitou.

Elektrická vodivost se odvíjí od pohybu volných, nebo i slabě vázaných elektrických nábojů v elektrickém poli a závisí také na typu nosičů náboje a jejich koncentraci. Elektrická vodivost u tuhých látek může být vnitřní, nebo povrchová. [6]

### 2.1 Elektrická vodivost plynů

Plyny obecně jsou velmi dobrými izolanty za podmínek, že na ně nepůsobí příliš silné elektrické pole. Plyn se stává vodivým při ionizaci části jeho neutrálních molekul. Při ionizaci plynu se z molekul, nebo atomů postupně vytvářejí elektrony a kladné ionty. U plynů probíhá ionizace objemová.

V elektrických strojích jsou plynná dielektrika nejvíce zastoupena vzduchem. Dále v nich může být použit dusík, který se nejvíce používá u rychloběžných strojů s velkým výkonem. [39]

### 2.2 Vnitřní elektrická vodivost tuhých izolantů

Vnitřní elektrická vodivost závisí na struktuře, chemickém složení, výskytu defektů vnitřního složení a na obsahu a druhu případných nečistot, nebo příměsí. Také je ovlivněna teplotou, což je způsobeno změnou počtu nosičů při změně teploty. [6]

### 2.3 Povrchová elektrická vodivost tuhých izolantů

Tato vodivost vzniká především pomocí vlhkosti, která je absorbovaná povrchem izolačního materiálu. Voda má dobrou elektrickou vodivost, takže na povrchu izolantu stačí jen malá vrstva pro vytvoření povrchové vodivosti.

Mezi rozhodující vlivy povrchové vodivosti patří relativní vlhkost prostředí, která se zvyšuje s nižší teplotou. Dalším vlivem je schopnost látky buď odpuzovat vodu (látko hydrofobní), nebo vodu vázat (látko hydrofilní). Vliv na povrchovou vodivost má také čistota a hladkost povrchu. [6]

## 2.4 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou energie přeměněná na teplo v dielektrickém materiálu, který se nachází ve střídavém elektrickém poli.

Tyto ztráty jsou veškerá energie, která se rozptýlí v dielektriku za časovou jednotku při působení elektrického pole. Působením elektrického pole je způsoben fázový posun mezi napětím a proudem. Když kondenzátor s dielektrikem připojíme na zdroj střídavého napětí, nebude proud předbíhat napětí o  $90^\circ$ , jako u ideálního kondenzátoru, ale o úhel  $\varphi$  menší než  $90^\circ$ . Pro tento úhel platí:

$$\varphi = 90 - \delta, \quad (2.1)$$

kde  $\delta$  znamená ztrátový úhel (míra nedokonalosti dielektrika).

Velikost dielektrických ztrát je vyjádřena ztrátovým úhlem  $\delta$ , ztrátovým činitelem  $\operatorname{tg} \delta$ , ztrátovým číslem  $\varepsilon''$  a měrnými dielektrickými ztrátami.

Ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta$  se dá vypočíst nahrazením ztrátového dielektrika ekvivalentním sériovým, nebo paralelním zapojením rezistoru a kondenzátoru. Potom ztrátový činitel vypočteme podle vztahů:

a) pro dvouprvkové paralelní náhradní zapojení:

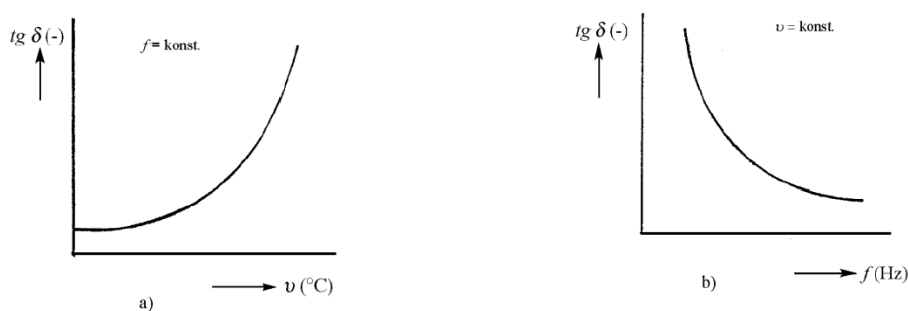
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega R_p C_p}, \quad (2.2)$$

b) pro dvouprvkové sériové zapojení:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_s C_s, \quad (2.3)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost,  $R_p$  je paralelní rezistor,  $R_s$  je sériový rezistor,  $C_p$  je paralelní kapacitor a  $C_s$  je sériový kapacitor.

Ztrátový činitel je ovlivněn teplotou a kmitočtem elektrického pole u každého dielektrika a intenzitou elektrického pole u feroelektrik a v případě ionizačních ztrát. [6] [24]



Obr. 2.1 a) teplotní b) kmitočtová závislost ztrátového činitele nepolárního dielektrika [6]

## 2.5 Průraz izolantů

Pokud je izolant namáhán vystavením elektrickému poli s intenzitou přesahující kritickou hodnotu vzniká výboj. Výboj je náhlý jev, při kterém vznikne dokonale

vodivá cesta v izolantu. Se vznikem výboje klesá napětí a roste proud. Výboj tuhé izolační látky trvale poškodí a zhorší jejich izolační vlastnosti, zatímco u plyných a kapalných izolantů se izolační vlastnosti zhorší pouze dočasně. Napětí potřebné pro vznik výboje mezi dvěma vodivými částmi je průrazné napětí.

Průraz může být čistě elektrický, nebo tepelný. Při čistě elektrickém průrazu vznikne nárazová ionizace, při které dojde k porušení krystalické mřížky izolantu za působení intenzivního elektrického pole. Pokud v izolantu vzniká teplo způsobené vnějším elektrickým polem, zvyšuje se v něm počet volných nosičů, což může způsobit tepelný průraz.

U plyných izolantů vzniká čistě elektrický průraz. Elektrická pevnost je ovlivněna tlakem plynu, vzdáleností elektrod a kmitočtem elektrického pole. Při nízkém tlaku plynu (1 – 100 Pa) vzniká doutnavý výboj, při kterém zůstávají elektrody studené, plyn září a proud je velmi malý. Při tlaku okolo 0,1 MPa se jedná o obloukový výboj. Obloukový výboj jasně září a má velkou proudovou hustotu s malým napětím.

Průraz tuhých izolantů může být čistě elektrický, což znamená, že průraz proběhne za ( $10^{-7}$  až  $10^{-8}$  s) a místo průrazu dosahuje průměru řádově 0,01 mm bez opálení jeho okolí. Nebo může být tepelný. Tento průraz trvá několik sekund až několik minut. Za tuto dobu se okolí místa průrazu zahřeje, zuhelnatí a popraská. Vznik tepelného průrazu je způsoben porušením tepelně elektrické rovnováhy izolantu, tato rovnováha je porušena růstem dielektrických ztrát spolu s teplotou.

Elektrická pevnost izolantů se odvíjí od teploty, tloušťky, druhu elektrického pole, frekvence elektrického pole, doby působení elektrického pole a je také ovlivněna částečnými výboji. Elektrická pevnost v rostoucí době působení elektrického pole klesá. [6]

# 3 TABULKY IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ

Tab. 3.1 Izolační materiály drážek a vinutí (1.část)

	Název materiálu	Typ	Izolace drážek a vinutí												
Aramidový papír [10]	NCPi		d [mm]	0,05	0,08	0,13	0,18	0,25	0,3	0,38	0,51	0,61	0,76		
			E <sub>p</sub> [kV/mm]	15,5	16	16	16,5	16,5	16,5	16	13	13			
			ε <sub>r</sub> [-]												
			tan δ [-]												
Aramidový papír [11]	NOMEX 411		ρ [Ω/cm]												
			d [mm]	0,13	0,18	0,25	0,38	0,58							
			E <sub>p</sub> [kV/mm]	18	18	18	16	16							
			ε <sub>r</sub> [-]	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3							
Dacron [12]	Dacron 70		tan δ [-]	3	3	3	3	3							
			ρ [Ω/cm]												
			d [mm]	0,15	0,2	0,23	0,28								
			E <sub>p</sub> [kV/mm]	7	7	9,5	12,5								
Sklolaminát [13]	G-10		ε <sub>r</sub> [-]	2,7	2,2	2,5	2,6								
			tan δ [-]	0,009	0,004	0,005	0,005								
			ρ [Ω/cm]	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>								
			d [mm]												
Polyesterová folie [14]	Mylar		E <sub>p</sub> [kV/mm]	31,5											
			ε <sub>r</sub> [-]	5											
			tan δ [-]	0,019											
			ρ [Ω/cm]												
Polyesterová folie [15]	3M Tape 56		d [mm]												
			E <sub>p</sub> [kV/mm]	0,276											
			ε <sub>r</sub> [-]	3,2											
			tan δ [-]	0,005											
			ρ [Ω/cm]	10 <sup>19</sup>											
			d [mm]	0,058											
			E <sub>p</sub> [kV/mm]	5											
			ε <sub>r</sub> [-]												
			tan δ [-]												
			ρ [Ω/cm]	10 <sup>12</sup>											

Tab. 3.2 Izolační materiály drážek a vinutí (2.část)

Izolační materiály drážek a vinutí	Název materiálu	Typ															
			$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]	$d$ [mm]
PA fólie [20]	Kapton FN	Kapton FN	$E_p$ [kV/mm]	272	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197	197
			$\varepsilon_r$ [-]	3,1	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
			$\tan \delta$ [-]	0,0015	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013
			$\rho$ [Ω/cm]	$1,4 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$2,3 \cdot 10^{17}$
PA fólie [21]	Kapton HN	Kapton HN	$d$ [mm]	0,025	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
			$E_p$ [kV/mm]	303	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240
			$\varepsilon_r$ [-]	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
			$\tan \delta$ [-]	0,0018	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Slída [18]	MSS08/013	MSS08/013	$\rho$ [Ω/cm]	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{17}$
			$d$ [mm]	0,1 - 1,5													
			$E_p$ [kV/mm]	25													
			$\varepsilon_r$ [-]														
Třívrstvý pružný laminát [25]	Myoflex 2N80	Myoflex 2N80	$\tan \delta$ [-]														
			$\rho$ [Ω/cm]	$10^{17}$ ( $\vartheta=23^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=550^\circ\text{C}$ )
			$d$ [mm]	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
			$E_p$ [kV/mm]	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Třívrstvý pružný laminát [26]	Myoflex 2NK25	Myoflex 2NK25	$\varepsilon_r$ [-]														
			$\tan \delta$ [-]														
			$\rho$ [Ω/cm]														
			$d$ [mm]	0,21	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Třívrstvý pružný laminát [27]	Myoflex PV	Myoflex PV	$E_p$ [kV/mm]	8	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
			$\varepsilon_r$ [-]														
			$\tan \delta$ [-]														
			$\rho$ [Ω/cm]														
Třívrstvý pružný laminát [27]	Myoflex PV	Myoflex PV	$d$ [mm]	0,13	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
			$E_p$ [kV/mm]	5	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
			$\varepsilon_r$ [-]														
			$\tan \delta$ [-]														
Třívrstvý pružný laminát [27]	Myoflex PV	Myoflex PV	$\rho$ [Ω/cm]														
			$d$ [mm]														
			$E_p$ [kV/mm]														
			$\tan \delta$ [-]														



Tab. 3.3 Impregnační materiály

	Název materiálu	Typ					
			$d$ [mm]	25 ( $\vartheta=20^{\circ}\text{C}$ )	13 ( $\vartheta=400^{\circ}\text{C}$ )	10 ( $\vartheta=600^{\circ}\text{C}$ )	
Impregnace	Slidový laminát [16]	Cogetherm-M	$E_p$ [kV/mm]				
			$\varepsilon_r$ [-]				
			$\tan \delta$ [-]	1			
			$\rho$ [ $\Omega/\text{cm}$ ]	$10^{16}$ ( $\vartheta=20^{\circ}\text{C}$ )	$10^{12}$ ( $\vartheta=400^{\circ}\text{C}$ )	$10^{10}$ ( $\vartheta=500^{\circ}\text{C}$ )	
	Epoxidová pryskyřice [17]	E2218	$d$ [mm]				
			$E_p$ [kV/mm]	10			
			$\varepsilon_r$ [-]				
			$\tan \delta$ [-]				
	Polyesterová pryskyřice [19]	Pedigree 600	$\rho$ [ $\Omega/\text{cm}$ ]	$10^{14}$			
			$d$ [mm]	0,0381			
			$E_p$ [kV/mm]	133,9			
			$\varepsilon_r$ [-]				
	Silikonová pryžová směs [22]	RTV 31	$\tan \delta$ [-]				
			$\rho$ [ $\Omega/\text{cm}$ ]				
			$d$ [mm]				
			$E_p$ [kV/mm]	17			
			$\varepsilon_r$ [-]	4,4			
			$\tan \delta$ [-]	0,03			
			$\rho$ [ $\Omega/\text{cm}$ ]	$1,6 \cdot 10^{14}$			

## **4 POŽADAVKY NA IZOLAČNÍ SYSTÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ, JEJICH FUNKCE A JEDNOTLIVÉ TYPY**

Izolační systémy v elektrickém stroji mají více funkcí než jen elektrické oddělení dvou částí. Jsou většinou také hlavní příčinou selhání elektrického stroje, a proto jsou na tyto systémy kladeny vysoké požadavky. Také se snažíme o zmenšení jejich rozměrů při zachování parametrů, což umožňuje zmenšení samotných strojů.

Izolační systémy se musí dimenzovat podle mechanických, elektrických a tepelných namáhání, které na ně ve výsledku působí. Tyto vlivy namáhání způsobují postupnou degradaci izolačních materiálů. Musí se také počítat s negativními vlivy, které působí na izolaci při chodu stroje. Mezi tyto vlivy patří hromadící se prach, působení chemikálií a vlhkosti. [1]

Izolace v elektrickém stroji:

- izolace drážková (drážkové klíny),
- izolace mezi fázemi,
- izolace mezi vodiči,
- izolace přípojných vodičů a svorek,
- impregnační laky a pryskyřice.

### **4.1 Funkce izolačních systémů**

Funkce izolačních systémů jsou elektrické oddělení dvou částí s různým potenciálem, buď oddělení dvou vinutí s různými fázemi, nebo oddělení fázového vinutí od konstrukce statoru a podobně. Další funkcí je zvýšení mechanické pevnosti vinutí, což znamená odolnost proti pevným částicím, které se do stroje mohou dostat spolu s chladícím vzduchem, nebo odolávání vibracím celého stroje. Izolace by také měla zajišťovat odolnost proti vlhkosti a odvod tepla. Hlavními parametry zvoleného izolačního materiálu jsou elektrická pevnost, relativní permitivita, rezistivita a tepelná vodivost. Pro svou dobrou odolnost a použitelnost pro tyto účely jsou nejpoužívanějšími izolačními materiály v elektrických strojích slída, polyester, aramid a pryskyřice. Těmto vlivům jsou elektrické stroje vystavovány v průběhu jejich zkoušení a hodnocení, aby se potvrdila reálná použitelnost daného materiálu, nebo slitiny materiálů, přičemž nejzásadnější vliv na životnost izolačních systémů má teplotní namáhání. [1]

### **4.2 Vlastnosti izolačních materiálů**

Elektrická pevnost je poměr průrazného napětí materiálu (minimální napětí, při kterém vzniká elektrické pole tak velké, že dojde k průrazu izolantu ionizací jeho

atomů a k jeho poškození) ku tloušťce materiálu. Elektrická pevnost by měla u izolantů být co největší a vypočte se podle rovnice (4.1). [2] [24]

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (4.1)$$

kde  $E_p$  je elektrická pevnost [kV/mm],  $U_p$  je průrazné napětí [kV] a  $d$  udává tloušťku izolace [mm].

Relativní permitivita určuje chování dielektrika v elektrickém poli. Je to bezrozměrná materiálová konstanta. Každá izolace má schopnost hromadit energii, když je na ni přivedeno napětí. Relativní permitivita udává kolikrát se zvětší kapacita kondenzátoru, při použití daného izolantu jako dielektrika namísto vakua. Hodnota relativní permitivity dielektrika je větší než 1. Permitivita izolantu se určí vynásobením jeho relativní permitivity a permitivity vakua. [3] [24]

Rezistivita, nebo také měrný elektrický odpor je materiálová konstanta, která udává odpor materiálu vztažený na jeho tloušťku. Jednotkou rezistivity je [ $\Omega/\text{cm}$ ]. U izolačních materiálů by měla být co největší.

## 4.3 Statorové vinutí

U statorového vinutí je důležitým parametrem činitel plnění drážky, který udává procentuální využití prostoru v drážce vodiči. Pro snížení ztrát na odporu vodiče je nejvýhodnější, když je činitel plnění drážky co největší.

Na vlastnosti statorového vinutí má také vliv čelo vinutí, což je ta část vinutí, která přesahuje ven z drážky neboli z čela jádra statoru. Čela vinutí jsou nutná pro uzavření elektrického okruhu, ale snahou je zkracovat jejich délku kvůli úspoře materiálu, ale také pro zvýšení účinnosti snížením ztrát na odporu vodiče.

### 4.3.1 Náhodně vinutá vinutí

Náhodně vinuté statorové vinutí sestává z měděných vodičů kruhového průřezu, které jsou navinuty buďto ručně, nebo strojem skrze drážky statorového jádra. Náhodně vinuté je z toho důvodu, že každý závit vodiče je uložen náhodně vedle některého dalšího závitu nezávisle na napětíové úrovni těchto závitů. Takže se mohou například dotýkat první a pátý závit.

Jelikož smyčka připojená na svorky může být přilehlá ke smyčce s nízkým napětím, je náhodně vinuté vinutí často využíváno pro stroje s pracovním napětím nižším než 1000 V, což také omezuje jejich výkon na řádově stovky kilowatt. Pro vyšší výkony je častěji využíváno tvarované vinutí.

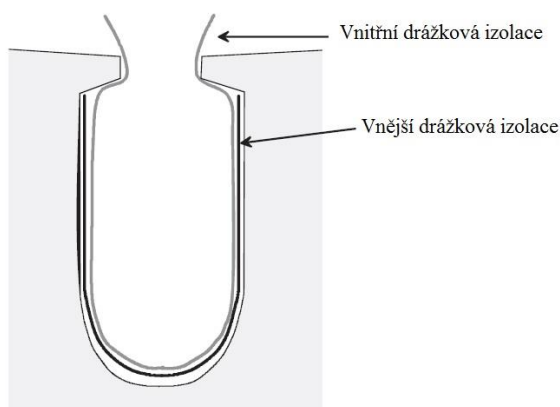
## 4.4 Izolace vodičů

Velké nároky v izolačním systému jsou kladeny na izolaci vodičů ve vinutí. A to z toho důvodu, že izolace musí odvádět teplo přímo ze zahříváných vodičů, kterými

teče hlavní statorový proud a jsou zahřívány Joulovými ztrátami. Tyto vodiče jsou nejvíce zahřívanou částí statoru. Izolace vodičů může dosahovat velmi malých rozměrů, kvůli nízkému napětí mezi závity, a proto jsou pro tyto účely voleny izolační materiály, které se nanášejí buďto ve formě pryskyřičného laku přímo na vodiče, nebo jsou vodiče ovinuty vláknitými či fóliovými izolacemi. Pro zlepšení vlastností a snížení nákladů se ve většině případů kombinuje více materiálů, přičemž samotná tloušťka izolace se odvíjí od tloušťky vodiče, a velikosti napětí. Izolace vodičů tedy zajišťuje izolaci jednotlivých vodičů mezi sebou ve vinutí, izolaci vodičů od statorového jádra a také jejich izolaci od vodivých neživých částí stroje. Nejpoužívanějšími izolacemi vodičů jsou lak, skleněné vláknité izolace, PVC a polyamidy. [1] [30] [39]

## 4.5 Izolace drážek

Izolace drážek se využívá pro ochranu vinutí vodičů před mechanickým poškozením o stěny drážek, které může být způsobeno vibracemi zařízení při provozu. Dále slouží k elektrickému oddělení vinutí od statorového jádra a také by měla pomáhat přenosu tepla z vinutí na statorové jádro, což znamená co nejlepší tepelnou vodivost. Drážková izolace je aplikována před umístěním vodičů do drážek a skládá se ze dvou vrstev, vnitřní a vnější, jak je vidět na obrázku č.1. Tyto izolace většinou dosahují tloušťky 0,1-0,65mm a jsou vyrobeny z izolačních papírů, nebo termoplastů. Po aplikaci izolací je méně než polovina celkového prostoru v drážkách využitelná pro samotné vodiče. [1]



Obr. 4.1 Vrstvy drážkové izolace [1]

Pokud je v drážce uloženo více než jedno vinutí, musí být přidána izolační vrstva mezi tyto dvě vinutí, toto opatření je nutné u strojů s napětím nad 1 kV. Při výrobě izolace drážek se musí dbát na to, aby na povrchu izolace nebyly nerovnosti vyplněné vzduchem. Takovéto nerovnosti mohou zapříčinit vibraci vodičů a tím jejich poškození, nebo také částečné výboje, které jsou způsobeny elektrickým

průrazem vzduchu v nerovnostech. Při částečném výboji vzniká jiskra, která poškozuje izolaci a při opakování může vést k jejímu porušení.



Obr. 4.2 Drážková izolace [8]

Drážková izolace vždy musí na koncích přecházet nejméně 5 mm při maximálním jmenovitém napětí 500 V. Přecházení drážkové izolace snižuje pravděpodobnost vzniku plazivých proudů, protože tyto proudy mohou vznikat na koncích drážek, kde je největší lokální elektrické pole. Konce vinutí různých fází se od sebe také musí izolovat, což se provádí po instalaci vinutí použitím izolačních tkanin. Potom se vinutí sváží pásky ze skleněných vláken a celý izolační systém je zpevněn impregnačním materiálem. [4] [1]

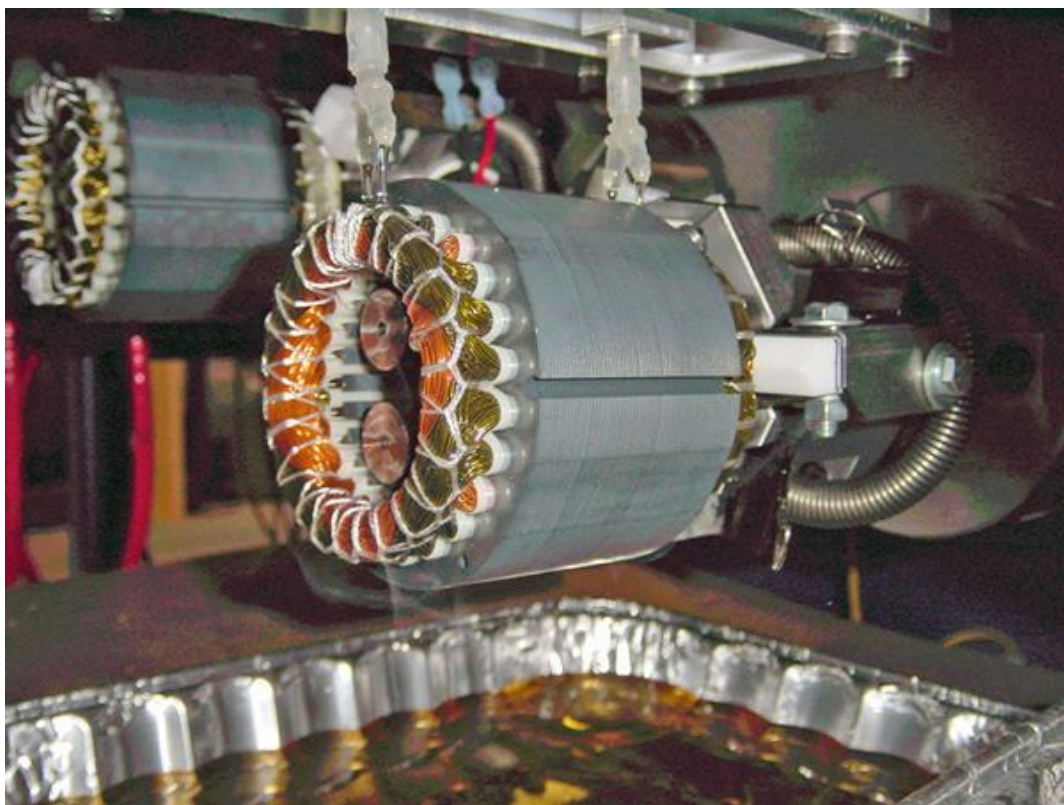
## 4.6 Impregnace strojů

Impregnace strojů slouží k zpevnění vinutí, zlepšení izolace, zajištění ochrany proti chemikáliím a nežádoucím vlivům okolí, zlepšení odvodu tepla a k zvýšení odolnosti proti vibracím. Takže ve výsledku napomáhá k prodloužení životnosti strojů. Příklady látek pro impregnaci strojů jsou uvedeny v tabulce **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Impregnace nízkonapěťových strojů se provádí tak, že se vinutí očistí, vysuší a zahřeje na určitou teplotu a při otáčení se zakapává pryskyřicí, nebo se celé ponoří

do laku. Vinutí se ponechá ponořené, aby se lak rozprostřel, čemuž napomáhá zahřátí vinutí, které způsobí snížení viskozity laku. Poté se vinutí vytáhne a přebytečný lak se nechá odkapat. Nakonec se vinutí umístí do pece, kde se impregnace nechá vytvrdit. Tato metoda je levná a snadno proveditelná. [1] [5]

Pro impregnaci vysokonapěťových strojů se využívá vakuové metody neboli VPI (Vacuum pressure impregnation).



Obr. 4.3 Impregnace statoru zakapávací metodou [9]

## 4.7 Vzduchová mezera

Vzduchová mezera se v točivém elektrickém stroji nachází mezi statorem a rotorem. Čím je mezera menší, tím získáme silnější a účinnější stroj. Zmenšování vzduchové mezery s sebou ale nese větší nároky na ostatní komponenty, nejvíce na to, aby byl stator s rotorem souosý, z toho důvodu, že se pohybují velice blízko sebe. Z toho tedy plyne, že konstrukce stroje musí mít menší tolerance.

## **5 FUNKČNÍ HODNOCENÍ IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ**

Funkční hodnocení se u izolačních systémů provádí za účelem ověření praktické použitelnosti izolačních materiálů. Funkční hodnocení se obvykle provádí porovnáváním kandidátského systému (systém u kterého ověřujeme jeho odolnost proti faktorům stárnutí) se systémem referenčním (systém, který pracoval úspěšně po dlouhou dobu a jsou získány zkušenosti s dostatečným počtem strojů). Porovnání těchto dvou systémů se provádí na konci každé funkční zkoušky porovnáním jejich středních dob do poruchy. Zkoušení musí probíhat na obou systémech se stejným zkušebním postupem a pomocí stejného zkušebního zařízení. Zařízení je v provozu vždy namáháno kombinací mnoha faktorů. Kvůli složitému simulování této kombinace se zařízení zkouší pouze na některé druhy namáhání.

### **5.1 Faktory stárnutí**

Faktory stárnutí jsou:

- tepelné,
- elektrické,
- klimatické,
- mechanické.

Podle primárních faktorů stárnutí se volí typ zkoušky. U malých, nebo středních nízkonapěťových strojů se provádí zkouška na teplotu a prostředí, ve kterém se stroj nachází. U středních a velkých strojů s tvarovaným vinutím může být prováděna zkouška i na elektrické a mechanické namáhání a u velmi velkých strojů se provádí zkouška hlavně na elektrické a mechanické namáhání, přičemž teplotní faktor a faktor prostředí mohou být méně významné.

### **5.2 Funkční zkoušky**

Funkční zkouška se provádí pro kvalifikaci izolačního systému. Provádějí se cykly zkoušky odolnosti. V každém cyklu se provede subcyklus stárnutí a subcyklus aklimatizace a diagnostiky. Subcyklus stárnutí znamená vystavení vzorků stanovenému faktoru stárnutí, který je zesílen, pro zrychlení stárnutí. Subcyklus diagnostiky má za úkol zjistit konec doby života a měří se v něm vlastnosti izolačního systému. Výsledky těchto zkoušek jsou srovnávací a neumožňují odhad konečné doby života izolačního systému v provozu, protože se neuplatňují přídatné faktory.

### 5.2.1 Tepelné funkční zkoušky

Mezinárodně jsou stanoveny tepelné třídy, které udávají doporučenou maximální teplotu pro nepřetržité použití elektrických izolačních systémů. Tepelná třída se stanovuje na základě provozních zkušeností, nebo podle výsledků tepelných zkoušek. [32]

Pro stanovení tepelné třídy tepelnými zkouškami by měly být zkoušené vzorky vystaveny minimálně třem, nebo čtyřem úrovním teploty v rozsahu dostatečném na to, aby byl prokázán lineární poměr mezi dobou do koncového bodu a převrácenou hodnotou absolutní teploty. Tepelná třída izolačního systému nevypovídá o tepelné třídě jednotlivých materiálů, které jsou v něm použity.

Překročení tepelné třídy způsobuje nevratné poškození izolace. Proto horní mezní teplota izolantů lze využívat jen v případě, že je možnost měřit teplotu izolace na kritických místech s dostatečnou přesností za použití termistorů či termočlánků zabudovaných ve stroji. Tepelná třída referenčního systému se nesmí lišit o více než jednu třídu od kandidátského a pro oba systémy se třídy volí podle normy ČSN EN 60085 z tabulky Tab. 5.1 Tepelné třídy. [23] [31] [34] [39]

Tab. 5.1 Tepelné třídy [32]

Tabulka tepelných tříd		
Rozsah teplot pro nepřetržité použití [°C]		Tepelná třída [°C]
≥ 90	< 105	90 (Y)
≥ 105	< 120	105 (A)
≥ 120	< 130	120 (E)
≥ 130	< 155	130 (B)
≥ 155	< 180	155 (F)
≥ 180	< 200	180 (H)
≥ 200	< 220	200 (N)
≥ 220	< 250	220 (R)
≥ 250	< 275	250 (-)

Pokud se tepelná třída kandidátského systému liší od tepelné třídy referenčního systému musí se použít jiné teploty stárnutí a doby subcyklů. [28]

Diagnosticke zkoušky mechanické, vlhkosti a napětím se provádí po každém vykonaném subcyklu tepelného stárnutí, aby se ověřil stav izolace.

Konec doby života izolačního systému nastane při subcyklu stárnutí mezi posledními dvěma diagnostickými zkouškami. Pro každý použitý vzorek se zaznamenává počet hodin tepelného stárnutí až do konce zkoušky. Vykreslí se grafy tepelné odolnosti kandidátského i referenčního systému a pokud se liší jejich



strmost výrazně dá se pochybovat, zda je možno srovnáním provést platnou klasifikaci systému. [29]

## **5.2.2 Analýza a klasifikace**

Koncový bod by měl způsobit takové porušení, které sníží odolnost vůči namáhání vyskytujícímu se ve skutečném provozu.

Grafické znázornění je provedeno tak, že na vodorovné ose je vynesena převrácená hodnota absolutní teploty ve stupních celsia a na ose svislé je čas v hodinách. Pokud se ve speciálním případě očekávaná doba života kandidátského systému liší od doby referenčního systému s totožnou teplotní třídou je možné kandidátský systém klasifikovat, ale je třeba tyto podmínky brát v úvahu a uvést je v protokolu i se zdůvodněním.

## **5.2.3 Elektrické funkční zkoušky**

Elektrická funkční zkouška se provádí přiložením napětí mezi části, u kterých je dominantní faktor elektrického stárnutí a které jsou určeny k práci při různých potenciálech. Pokud je využita i zkouška vlhkostí, elektrická (napěťová) zkouška se provede při pokojové teplotě na mokřích vzorcích, přičemž místa připojení mohou být vysušena.

Konec doby života izolačního systému je určen jako průraz během stárnutí, nebo porucha při diagnostické zkoušce. Pokud se provádí zkoušky při různých napětích, může se graficky zobrazit závislost doby života na elektrickém namáhání. Při zkoušce doba života kolísá, proto je důležité získat dostatečný počet dob do poruchy. Pro analýzu se vykreslí grafy elektrické odolnosti obou systémů.

Je užitečné zaznamenat podrobnosti zkoušky jako:

- maximální jmenovité napětí systému,
- zkušební teplota,
- frekvenci a napětí subcyklů stárnutí a jejich doby trvání,
- provedení zkoušeného předmětu,
- počty vzorků při jednotlivých napětích,
- doby do poruchy,
- grafické znázornění elektrické odolnosti pro jednotlivé namáhání. [28] [29]

## **5.2.4 Multifaktorové funkční zkoušky**

Současně působící různé faktory vlivu se simulují současně prováděnými zkouškami stárnutí. Pokud je jeden z působících faktorů důležitější pro zkoušku, může se tento faktor urychlit a ostatní faktory zůstanou na provozní úrovni. Při urychlení více faktorů by urychlení mělo být u každého faktoru stejné. Stanovují se referenční provozní podmínky (podmínky pro které byl stroj navržen). [28]

### 5.3 Zkoušené předměty a zkušební vzorky

Zkoušený předmět je zařízení, na kterém jsou vykonávány funkční zkoušky. Může se jednat o stroj, nebo pouze jeho část a, nebo speciální model vytvořený pro zkoušky. Zkoušený předmět také může obsahovat více zkušebních vzorků, což jsou části zkoušeného předmětu, které umožňují získání jednoho zkušebního údaje a mohou zahrnovat více komponent izolace. [28]

Pokud to je ekonomicky možné a dovoluje to velikost stroje, může být použit jako zkoušený předmět stroj, nebo jeho část. Pro zkoušku je potřeba nejméně 5 zkušebních vzorků pro každý faktor stárnutí. Pokud není možné použít stroj, použije se zkušební model.

Model pro provedení zkoušky musí obsahovat všechny podstatné prvky, které jsou simulovány a považují se za blízké aproximace. U vysokonapěťových strojů mohou být jako zkušební modely použity prvky představující část cívky, nebo tyče v případě, že je známo stárnutí této části. Namáhání působící na zkušební vzorky představující část cívky musí být spolehlivě reprodukovatelné.

Zkoušené předměty tedy mohou být:

- motorety,
- motory,
- statorová vinutí v drážkách,
- pólová vinutí,
- rotorová vinutí v drážkách.

Pro zkoušené předměty musí být uvedeno:

- jaký výrobek je reprezentován danými zkoušenými předměty,
- jaká konstrukce je zvolena,
- jaký počet předmětů je požadován,
- jaké požadavky jsou kladeny na zkušební postupy.

Před zahájením první zkoušky stárnutím je potřeba ověřit kvalitu všech vzorků. Pokud jsou všechny vzorky v pořádku předejde se, aby lépe reprezentovaly systém v provozu. Poté je proveden diagnostický test, který zahrnuje zatížení napětím, test částečných výbojů, mechanické zatížení a působení vlhkosti či chemikálií. [33] [29]

Zkoušené předměty musí být použity stejné pro referenční i kandidátský izolační systém při funkční zkoušce. [38]

### 5.4 Zkušební postupy

Při zkoušce odolnosti je zkoušený předmět vystaven buďto jednomu, nebo více faktorům stárnutí, které jsou dány provozními podmínkami a při kterých vznikají změny jeho vlastností, které jsou vyhodnocovány diagnostickými zkouškami.

Diagnostický faktor znamená namáhání komponentu izolace pro určení jejího stavu, aniž by vznikl vliv na stárnutí.

Požadavky na zkušební postupy:

- počáteční elektrická diagnostická zkouška,
- mechanické namáhání,
- vystavení vlhkosti,
- elektrická diagnostická zkouška (kritérium koncového bodu),
- způsob ohřevu při tepelném stárnutí. [28]

Cyklus zkušebního postupu probíhá následujícím způsobem:

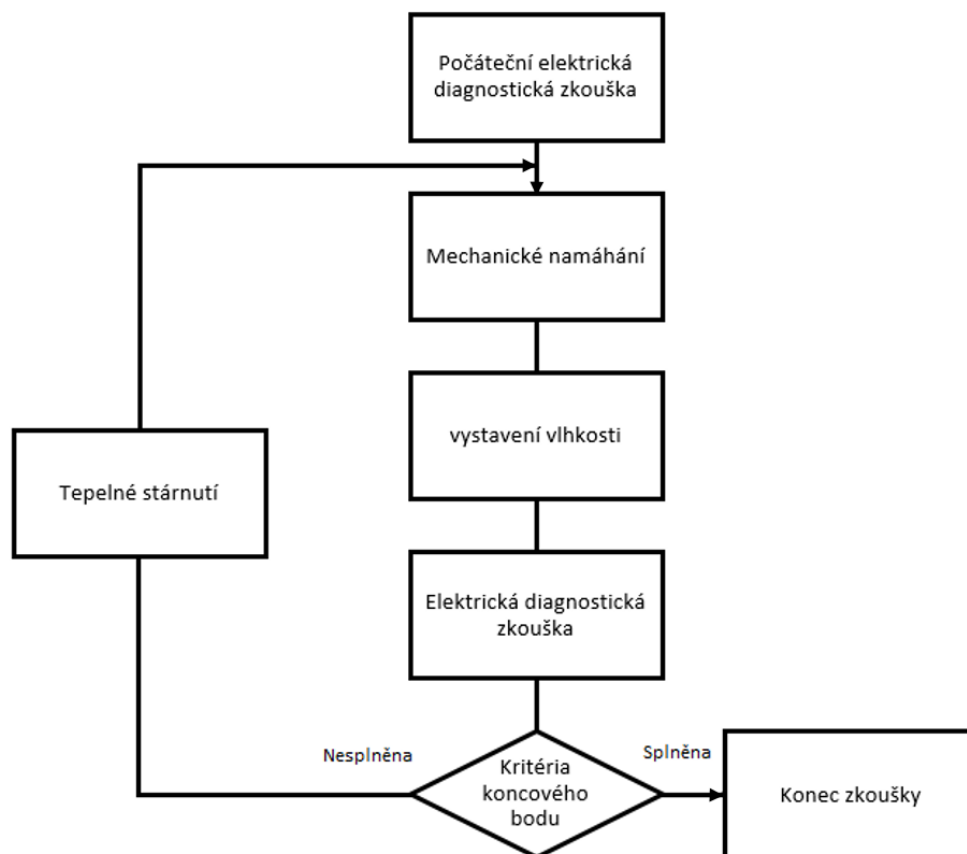
1. subcyklus tepelného stárnutí,
2. aklimatizace a diagnostický subcyklus: a) mechanická zkouška, b) aklimatizace vlhkostí, c) napěťová zkouška.

Kromě těchto zkoušek je možné provádět doplňující nedestruktivní zkoušky jako měření izolačního odporu, měření ztrátového činitele, nebo zkouška částečných výbojů. Takovéto zkoušky umožňují zjistit bližší informace o průběhu procesu stárnutí izolace. [29]

### **5.4.1 Počáteční třídící zkoušky**

Před provedením prvního subcyklu tepelného stárnutí je třeba zkoušené předměty vizuálně zkontrolovat a podrobit počáteční třídící zkoušce. Třídící zkouška se provádí pro vyloučení vadných zkoušených předmětů.

1. Počáteční elektrická diagnostická zkouška znamená přiložení napětí o velikosti a za podmínek daných plánovaným používáním zkoušeného předmětu.
2. Mechanické namáhání.
3. Jiné kondicionování je možno provést na základě požadavků plánovaného používání.
4. Vystavení vlhkosti.
5. Elektrická diagnostická zkouška, popřípadě jiná diagnostická zkouška. [38]



Obr. 5.1 Vývojový diagram zkoušky

### 5.4.2 Subcyklus tepelného stárnutí

Při subcyklu tepelného stárnutí jsou testované předměty vystaveny vyšší teplotě, než je jejich provozní teplota a to z toho důvodu, aby jejich stárnutí probíhalo rychleji, než za normálního provozu.

Předběžná diagnostická a napěťová zkouška musí být provedena před prvním subcyklem tepelného stárnutí.

Subcyklus tepelného stárnutí probíhá tak, že se zkoušený předmět o pokojové teplotě vloží do rozehráté pece a po určité době se horký předmět vrátí zpět do pokojové teploty. Pokud se předpokládaná tepelná třída kandidátského systému liší od referenčního, musí se vybrat jiné teploty a doby subcyklů. [29]

### 5.4.3 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání je faktorem stárnutí a může být způsobeno vibracemi, elektrodynamickými silami, a nebo termomechanickým namáháním, které vzniká při častých změnách zatížení v provozu. [28]

Po každém subcyklu tepelného stárnutí a ochlazení zkoušeného předmětu se provede mechanické namáhání. Toto namáhání způsobí vytváření trhlin v tepelně

degradovaném materiálu, což zajistí dobré diagnostické hodnocení, pokud je po mechanickém namáhání zkoušený předmět vystaven vlhkosti. [29]

Mechanické namáhání se provádí za pomoci vibračního stolu, na který se připevní zkoušený předmět a následně na něj působí sinusové vibrace s kmitočtem 48 Hz až 62 Hz, které mají zrychlení  $15 \pm 3 \text{ m/s}^2$  po dobu  $60 \pm 5 \text{ min.}$  [37]

#### 5.4.4 Zkouška vlhkostí

Vlhkost má nepříznivý vliv na izolaci a může způsobit její poruchu. Izolace absorbuje vlhkost a tím se snižuje její izolační odpor a zvyšují dielektrické ztráty.

Při zkoušce vlhkostí musí být na vinutí viditelné kapky a systém má mít nižší teplotu, než je teplota rosného bodu. Vlhkost na izolaci zvyšuje schopnost napěťové zkoušky detekovat případné trhliny. Pro ustálení izolačního odporu je požadovaná doba působení alespoň 48 hodin.

Při zkoušce se zkoušené předměty vystaví 95% - 100% relativní vlhkosti na dobu 48 h při teplotě o  $5^\circ\text{C}$  –  $10^\circ\text{C}$  vyšší, než teplota místnosti. [29]

#### 5.4.5 Elektrická diagnostická zkouška

Po každém subcyklu stárnutí a zkoušce vlhkostí se provede napěťová zkouška. Bezprostředně před připojením napětí se musí z povrchu setřít kapky vody. Napětí s kmitočtem od 48 Hz do 62 Hz je přiloženo po dobu nejméně 10 minut, přičemž porucha odpovídá proudu danému normou ČSN EN 61857-21 ed.3 podle tabulky Tab. 5.2 Elektrická diagnostická zkouška před koncem měřeného intervalu. Konec doby života zkoušeného předmětu je tedy ztráta schopnosti udržení přiloženého napětí po minimální dobu 10 minut. [37]

Tab. 5.2 Elektrická diagnostická zkouška [37]

Tabulka proudů pro ukončení diagnostické zkoušky		
Izolační materiál	Napětí diagnostické zkoušky [V]	Proud konce doby života [A]
Mezi vodiči	$110 \pm 10$	0,5 - 0,75
Mezi cívkami	$600 \pm 30$	0,5 - 0,75
Mezi cívkou a kostrou	$600 \pm 30$	0,5 - 0,75

#### 5.4.6 Doba trvání a počet subcyklů stárnutí

Kombinace namáhajících vlivů se volí tak, aby střední doba do poruchy trvala nejméně 20 dní. Dále aby kombinace nejmenšího namáhání vyvolala střední dobu do poruchy delší než 250 dní. Před dosažením střední doby do poruchy musí proběhnout pro skupinu vzorků 5 až 10 subcyklů. Z toho důvodu nesmí doba trvání každého subcyklu být kratší než 2 dny a delší než 30 dní. Může být výhodné pro

každý cyklus stárnutí vybrat narůstající periodu. Navrhované teploty a doby stárnutí jsou uvedeny podle normy ČSN EN 61857-1 ed.3 v tabulce Tab. 5.3 Navrhované teploty a doby stárnutí pro předpokládané tepelné třídy, kde jsou přiřazeny k jednotlivým předpokládaným tepelným třídám. Pokud méně, než polovina z celkového počtu zkoušených předmětů dosáhne svého konce života po provedení pěti cyklů, doba subcyklu může být zdvojnásobena. A pokud jedné třetině, nebo více předmětů nastane konce doby života již po třech cyklech, je možné dobu subcyklu zkrátit na polovinu. [36]

**Tab. 5.3 Navrhované teploty a doby stárnutí pro předpokládané tepelné třídy [38]**

Tabulka navrhovaných teplot a dob stárnutí pro předpokládané tepelné třídy									
Doba trvání umělého stárnutí v jednom cyklu [h]	Předpokládaná tepelná třída izolačního systému [°C]								
	90	105	120	130	155	180	200	220	250
	Navrhovaná teplota stárnutí [°C]								
504 - 840	105	120	135	145	170	195	215	235	265
48 - 336	120	135	150	160	185	215	235	255	285
24 - 72	135	150	165	175	200	235	255	275	305

#### 5.4.7 Kritéria koncového bodu

Následující situace značí ukončení zkoušky, přičemž situace označené a), b), c), d) jsou zjištěny dodatečnými diagnostickými zkouškami:

- elektrický průraz během stárnutí,
- elektrický průraz po provedení zkoušky vlhkosti,
- a) překročení dohodnutých počátečních napětí částečných výbojů,
- b) překročení maximální úrovně výbojů při zvoleném napětí,
- c) překročení předem určeného ztrátového činitele při jmenovitém napětí,
- d) překročení nárůstu ztrátového činitele při definovaných napěťových hladinách. [36]

#### 5.5 Metody ohřevu

Pro zkoušku tepelným stárnutím je vhodné použít pec s nuceným prouděním, protože zajišťuje to, že jsou všechny části testovaného předmětu vystaveny teplotě stárnutí. Teplota musí být po celou dobu působení na zkoušené předměty udržována, a to v rozsahu  $\pm 2$  °C při teplotách do 180 °C a  $\pm 3$  °C při teplotách od 180 °C do 300 °C. Také je vhodné při vkládání testovaných předmětů do pece předměty pokaždé jinak rozmístit, aby se zamezilo působení vlivu případných rozdílů teplot na různých místech pece. [38]

## 6 TESTOVÁNÍ ZAŘÍZENÍ PRO TEPELNÉ STÁRNUTÍ

Před provedením samotného tepelného stárnutí zkoušeného předmětu je třeba ověřit funkčnost zařízení pro ohřev a zda splňuje požadavky na něj kladené. Pec má zajistit ohřev vzduchu v komoře na požadovanou teplotu určenou prováděnou zkouškou a tuto teplotu udržovat v požadovaných mezích.

### 6.1 Měření průtoku vzduchu pecí

Cílem tohoto měření bylo zjistit dobu za kterou se vymění vzduch v testované teplotní komoře při různém nastavení proudění vzduchu a otevření ventilační klapky.

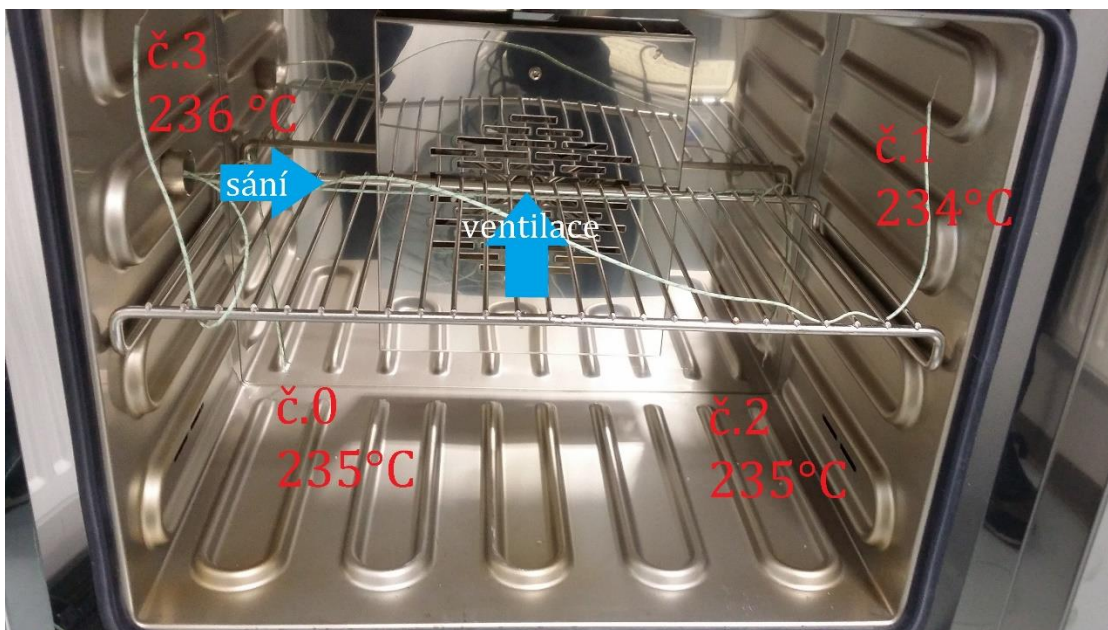
Měřenou veličinou byla rychlost proudění vzduchu skrze ventilační otvor pece s klapkou. Pro měření této rychlosti byl použit anemometr Meterman TMA10 v.č. 06090080. Z rychlosti proudění vzduchu a z plochy ventilačního otvoru byl vypočten průtok a z něj následně doba potřebná k výměně vzduchu v teplotní komoře.

Při nastavení 100 % rychlosti ventilátoru pro proudění vzduchu a 100 % otevření ventilační klapky byl pro komoru o objemu 0,032 m<sup>3</sup> naměřen čas výměny vzduchu 17 s. A při snížení rychlosti ventilátoru na 30 % byl naměřen čas 292 s. Teplotní komora tedy podle normy ČSN EN 60216-4-1 vyhověla pro teplotní zkoušky, protože dokáže dosáhnout 5 až 20 výměn za hodinu.

### 6.2 Měření rozdílů teplot v peci

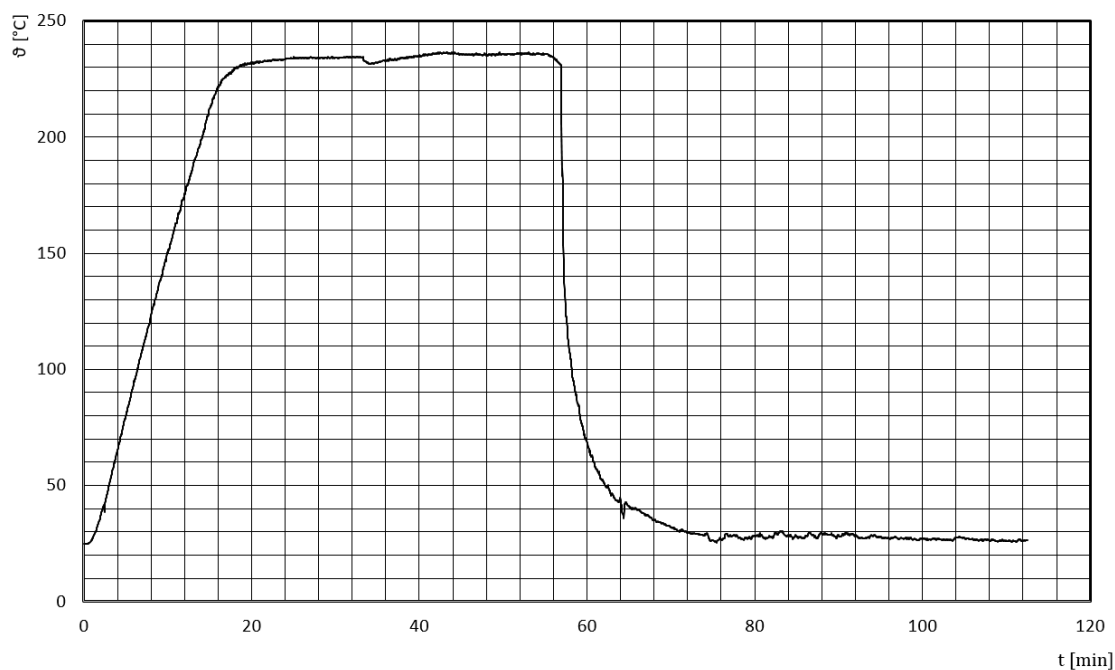
Cílem tohoto měření bylo zjistit rozdíly teplot na různých místech v peci pro tepelné stárnutí, při udržování stálé nastavené teploty a tím ověřit, zda splňuje požadavek na maximální odchylku teploty  $\pm 3$  °C podle normy ČSN EN 61857-1 ed.3 při zkušební teplotě 235 °C.

Měření bylo provedeno na peci Memmert UF30 inv.č. SAP:001000255829-0000. K měření teplot byly použity čtyři termočlánky typu K rozmístěné v teplotní komoře tak, jak je ukázáno na obrázku Obr. 6.1 Rozmístění termočlánků v teplotní komoře.



**Obr. 6.1 Rozmístění termočlánků v teplotní komoře**

Teploty naměřené jednotlivými články po ustálení jsou uvedeny na obrázku Obr. 6.1 Rozmístění termočlánků v teplotní komoře. Rozdíly naměřených teplot jednotlivými termočlánky tedy nebyly po ustálení teploty 235 °C větší než 3 °C, což znamená, že teplotní komora vyhověla. Průběh měření teploty termočlánkem č.2 můžeme vidět na obrázku Obr. 6.2 Graf průběhu teploty měřené termočlánkem 2 v závislosti na čase.



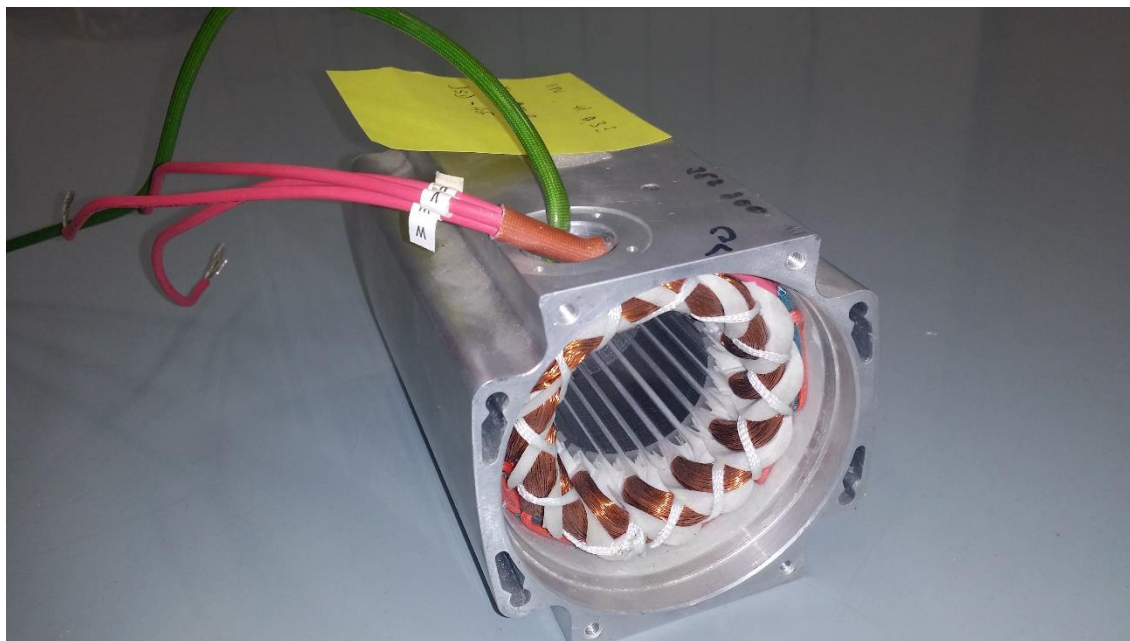
**Obr. 6.2 Graf průběhu teploty měřené termočlánkem 2 v závislosti na čase**



## 7 TESTOVÁNÍ IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ STATORŮ

Tato část se zabývá samotným testováním izolačních systémů pomocí umělého stárnutí a diagnostických zkoušek. Zkoušky je třeba provést pro zjištění odolnosti zařízení vůči vlivům, které na něj budou působit ve skutečném provozu. Tyto vlivy jsou při zkouškách zesíleny pro urychlení zkoušek.

Zkoušky byly provedeny zároveň na dvou různých statorech od firmy Baumüller, které je možné vidět na obrázcích Obr. 7.1 Zkoušený předmět (stator) č.1 před zahájením zkoušek a Obr. 7.2 Zkoušený předmět (stator) č.2 před zahájením zkoušek. Oba statory mají stejnou tepelnou třídu, takže pro ně byla použita stejná teplota stárnutí.



**Obr. 7.1 Zkoušený předmět (stator) č.1 před zahájením zkoušek**

Jelikož jsou zkoušenými předměty statorová vinutí v drážkách je třeba zkoušet deset zkušebních vzorků v alespoň dvou zkoušených předmětech a výroba zkoušených předmětů se musí shodovat s postupem výroby normálního, popřípadě předpokládaného výrobního procesu. Při této zkoušce byl počet zkušebních vzorků dodržen, ale po dohodě s vedoucím práce byl zvolen pouze jeden zkoušený předmět pro každý stator.



Obr. 7.2 Zkoušený předmět (stator) č.2 před zahájením zkoušek

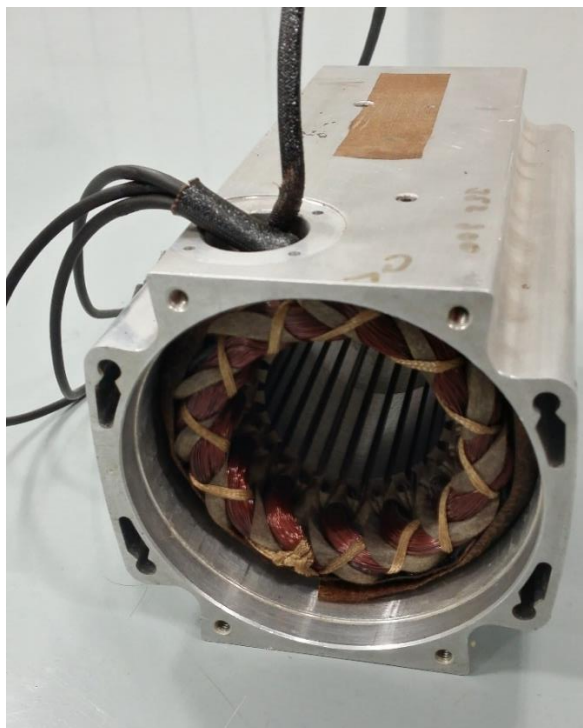
## 7.1 Postup zkoušky

Po otestování zařízení pro tepelné stárnutí bylo možné zahájit zkoušku. Prvním krokem zkoušky byla vizuální kontrola zkoušených předmětů pro zjištění případných povrchových vad a změření izolačního odporu mezi vinutím a kostrou. Izolační odpor byl měřen přístrojem Chauvin Arnoux C.A 6525 při 500 V. Při měření izolačních odporů obou zkoušených předmětů přístroj ukazoval maximální výchylku, což znamená odpor větší než 1000 M $\Omega$ . Předměty tedy bylo možné podrobit dalším zkouškám. Zkouška byla provedena v opakujících se cyklech složených ze subcyklů tepelného stárnutí a diagnostiky.

## 7.2 Subcyklus tepelného stárnutí

Bylo provedeno celkem 6 subcyklů tepelného stárnutí. Při těchto subcyklech byly zkoušené předměty o pokojové teplotě vystaveny zvýšené teplotě 235 °C po dobu 24 hodin podle normy ČSN EN 61857-1 ed.3 a poté znovu navráceny do pokojové teploty. Teplota stárnutí byla zajištěna pecí Memmert UF30, inv.č. SAP:001000255829-0000 s nuceným prouděním, která byla předem otestována v kapitole 6. Zkoušené předměty byly vloženy do pece pokaždé v jiném uspořádání, aby se zamezilo vlivu případných rozdílů teplot. Celková doba působení zvýšené teploty na oba předměty tedy byla 144 hodin. Zkoušené předměty po provedení dvou cyklů můžeme vidět na obrázcích Obr. 7.3 Zkoušený předmět (stator) č.1 po

provedení dvou cyklů zkoušky a Obr. 7.4 Zkoušený předmět (stator) č.2 po provedení dvou cyklů zkoušky.



**Obr. 7.3 Zkoušený předmět (stator) č.1 po provedení dvou cyklů zkoušky**



**Obr. 7.4 Zkoušený předmět (stator) č.2 po provedení dvou cyklů zkoušky**

## **7.3 Diagnostický subcyklus**

Diagnostických subcyklů bylo provedeno celkem 6, jeden po každém subcyklu tepelného stárnutí. Diagnostický subcyklus se u této zkoušky skládal ze subcyklu mechanického namáhání a ze subcyklu elektrické diagnostické zkoušky v tomto pořadí. Mezi mechanickým namáháním a elektrickou diagnostickou zkouškou nebylo provedeno vystavení vlhkosti, a to z toho důvodu, že oba zkoušené předměty mají stupeň ochrany IP 44. Tento stupeň ochrany zajišťuje zamezení vniknutí stříkající vody ve všech úhlech.

### **7.3.1 Subcyklus mechanického namáhání**

Subcyklus mechanického namáhání měl za úkol simulovat namáhání v reálném provozu, což v tomto případě byly vibrace způsobené chodem stroje. Zkoušené předměty byly tomuto namáhání vystaveny po prvních třech subcyklech tepelného stárnutí. Po zbylých subcyklech bylo zkušební zařízení využito k jiným účelům.

Pro zkoušku mechanickým namáháním byl použit vibrační budič RMS SW8142-24. Zkouška každého zkoušeného předmětu trvala jednu hodinu, což znamená, že byl každý z nich vystaven celkem třem hodinám mechanického namáhání vibracemi. Vibrace byly sinusového průběhu o frekvenci 50 Hz se zrychlením 1,5 g.

### **7.3.2 Subcyklus elektrické diagnostické zkoušky**

V tomto subcyklu šlo o zjištění stavu izolačního systému zkoušených předmětů. Zkouška byla provedena šestkrát. Po prvních třech subcyklech mechanického namáhání a po zbylých třech subcyklech tepelného stárnutí. Zkoušen byl pouze izolační systém mezi cívkami a kostrou z důvodu provedení zkoušených předmětů, které měly konce vinutí spojeny do hvězdy.

Pro zkoušení byl použit přístroj GWinstek GPT-9902A, inv.č. SAP:000000318722-0000. Při zkoušce bylo mezi cívky a kostru připojeno napětí 600 V o frekvenci 50 Hz po dobu deseti minut. Podle tabulky Tab. 5.2 Elektrická diagnostická zkouška byl sledován proud procházející mezi cívkami a kostrou. Pro zkoušený předmět č.1 byly naměřeny proudy 0 A při všech šesti zkouškách. U zkoušeného předmětu č.2 byly při prvních dvou zkouškách naměřeny proudy 0,6 mA a při zbývajících čtyřech zkouškách 0,5 mA.

### **7.3.3 Vyhodnocení měření**

Po provedení všech šesti zkoušek byly proudy mezi vinutími a kostrou zkoušených předmětů v mezích určených jako koncový bod zkoušky. Proud u statoru č.1 byl 0 A, a proud u statoru č.2 byl 0,5 mA. To znamená, že statory ve zkoušce obstály a je možné je provozovat s tepelnou třídou 180 °C (H).

## 8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo popsat základní vlastnosti izolačních materiálů, uvést materiály používané v elektrických strojích a vyjmenovat požadavky a účel jednotlivých izolací v elektrickém stroji. Dále se práce zabývá seznámením s funkčními zkouškami izolačních systémů. Tyto zkoušky jsou chronologicky popsány a je tak vytvořen soubor požadavků a postupů při testování izolačních systémů, který zjednodušuje orientaci v problematice daných zkoušek. Podle shrnutých postupů je potom provedena zkouška izolačních systémů dvou zkoušených předmětů.

První část je věnována izolačním materiálům. Je zde definována polarizace izolantů, jejich elektrická vodivost vnitřní a povrchová, dielektrické ztráty a na závěr vznik a jednotlivé typy průrazů izolantů.

V další části jsou tabulky izolačních materiálů používaných v elektrických strojích s uvedenými hodnotami jako elektrická pevnost, tloušťka, nebo permitivita.

Dále jsou uvedeny jednotlivé části izolačního systému, jejich funkce a požadované vlastnosti, jako schopnost elektrického oddělení dvou různých potenciálů, nebo tepelná vodivost. Jsou zde také popsány vlastnosti jako Elektrická pevnost, relativní permitivita, nebo rezistivita.

Následující kapitola se věnuje funkčnímu hodnocení izolačních systémů. Jsou zde vyjmenovány a popsány jednotlivé nepříznivé vlivy, které mohou na izolační systém v provozu působit. Dále jsou definovány zkoušené předměty a je uvedeno jakých podob mohou nabývat. Jsou zde také postupy zkoušek a jejich dílčích částí v daném pořadí.

V další části byla provedena měření pro ověření, zda zařízení pro tepelné stárnutí vyhovuje požadavkům daným normami. Jako zařízení pro tepelné stárnutí zde byla použita pec s nuceným prouděním. Byl ověřován průtok vzduchu pecí. Při maximální rychlosti ventilátoru pro proudění vzduchu a maximálním otevření ventilační klapky trvala výměna vzduchu v objemu komory 17 s a při 30 % rychlosti ventilátoru 292 s, což znamená, že podle normy zařízení vyhovělo, protože dosahuje 5 až 20 výměn vzduchu za hodinu. Na zařízení pro tepelné stárnutí byly také otestovány rozdíly teplot na různých místech v teplotní komoře. Teploty byly měřeny na čtyřech místech, přičemž po ustálení požadované teploty 235 °C byl naměřen největší rozdíl teplot 2 °C, což vyhovuje normám, které stanovují maximální rozdíl 3 °C.

V poslední části byla provedena zkouška na dvou testovaných předmětech v podobě statorů. Zkušebních cyklů bylo provedeno celkem 6, přičemž mechanickému namáhání byly testované předměty vystaveny třikrát. Před zahájením zkoušky byly předměty zkontrolovány pro zjištění případných výrobních vad. Cyklus zkoušky se skládal ze subcyklu tepelného stárnutí, mechanického

namáhání a elektrické diagnostické zkoušky. Jednotlivé subcykly byly prováděny v pořadí, jak jsou uvedeny. Zkoušené předměty byly vystaveny celkem 144 hodin teplotě 235 °C a 3 hodiny mechanickému namáhání. Při poslední elektrické diagnostické zkoušce byl naměřen proud mezi vinutími a kostrou u statoru č.1 0 A a u statoru č.2 0,5 mA. To znamená, že po provedení šesti cyklů zkoušky oba zkoušené předměty nedosahovaly proudu koncového bodu 0,5 A až 0,75 A a zkouškou tak prošly se zachováním dobrých izolačních vlastností, takže je možné je používat s tepelnou třídou 180 (H) v běžném provozu.

# Literatura

[1] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 9781118701621.

[2] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 3., rozš. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-154-3.

[3] JAROLÍM, Karel. *Elektrotechnické tabulky pro průmyslové školy*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1959. Učebnice odborných škol.

[4] STONE, Greg. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2004. IEEE Press series on power engineering.

[5] TEMCo [online]. 2016, 1 [cit. 2016-10-25]. Dostupné z: [http://www.temcoindustrialpower.com/product\\_selection.html?p=insulation\\_varnish\\_dip\\_and\\_bake](http://www.temcoindustrialpower.com/product_selection.html?p=insulation_varnish_dip_and_bake)

[6] Materiály a technická dokumentace Část Materiály v elektrotechnice. Moodle.vutbr.cz [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: [https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/262653/mod\\_resource/content/1/BMTD%20MEI%20.pdf](https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/262653/mod_resource/content/1/BMTD%20MEI%20.pdf)

[7] Dielectric loss. In: *The free dictionary* [online]. [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Dielectric+Loss>

[8] Silent-czech. *Silent-czech.cz* [online]. [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: <http://www.silent-czech.cz/mini/w-640-640/data/img/galerie/img-6958.jpg>

[9] Trickle impregnation machines. *Heattek.com* [online]. [cit. 2016-11-02]. Dostupné z: [http://www.heattek.com/evo\\_elements/jpg/lrg-trickle.jpg](http://www.heattek.com/evo_elements/jpg/lrg-trickle.jpg)

[10] Aramid Paper / Aramid Tapes. *NCPI* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.polyimide-films.com/eng/UploadFiles/201378164757117.pdf>

[11] NOMEX TYPE 411. *Ukinsulations* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.ukinsulations.co.uk/pdfs/dupont-nomex-type-411.pdf>

[12] Material data sheet. *IRG Power systems* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://irgpowersystems.com/Data%20Pages/Electrical%20Insulation%20Materials/Flexible%20Laminates%20&%20Films/DMD%2070%20100%20Laminate.pdf>

[13] Fiberglass Laminates. *Laminated Plastics* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.laminatedplastics.com/fiberglasslaminates.pdf>

[14] Technical data sheet Mylar (Polyester Film). *Laminated Plastics* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.laminatedplastics.com/polyester.pdf>

[15] 3M™ Polyester Film Electrical Tape 56 with Thermosetting Rubber Adhesive. *Multimedia.3m* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://multimedia.3m.com/mws/media/373900/3m-polyester-film-electrical-tape-56.pdf>

[16] Cogetherm technical data sheet. *Professional plastics* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/CogethermDataSheet.pdf>

[17] E2218 Epoxy Resin. *RC-components* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0f8d/0900766b80f8dfad.pdf>

[18] MSS08/013 - MICA. *RS-components* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://docs-asia.electrocomponents.com/webdocs/127b/0900766b8127b415.pdf>

[19] Pedigree 600 Polyester Resin. *Superior ESSEX* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: [http://www.spsx.com/uploadedFiles/Distribution/North\\_America/Essex\\_Brownell/Partners/Ped600\\_080527rev2.pdf](http://www.spsx.com/uploadedFiles/Distribution/North_America/Essex_Brownell/Partners/Ped600_080527rev2.pdf)

[20] DuPont™ Kapton® FN POLYIMIDE FILM. *DuPont* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-FN-datasheet.pdf>

[21] DuPont™ Kapton® HN polyimide film. *DuPont* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-HN-datasheet.pdf>

[22] RTV31. *Techsil* [online]. [cit. 2016-11-05]. Dostupné z: <https://www.techsil.co.uk/media/pdf/TDS/MOSI02024-tds.pdf>



[23] BUREŠ, Milan. Třídy tepelné odolnosti elektrické izolace. *Elektrika.cz* [online]. 2003, , 1 [cit. 2016-11-06]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/tto030303/view>

[24] Electrical properties of insulating materials. *Readorrefer* [online]. 2015 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: [http://www.readorrefer.in/article/Electrical-properties-of-insulating-materials\\_129/](http://www.readorrefer.in/article/Electrical-properties-of-insulating-materials_129/)

[25] Vonroll Myoflex 2N80. 2006. Dostupné také z: <http://www.vonroll.com/en/>

[26] Vonroll Myoflex 2NK25. 2006. Dostupné také z: <http://www.vonroll.com/en/>

[27] Vonroll Myoflex PV. 2006. Dostupné také z: <http://www.vonroll.com/en/>

[28] ČSN EN 60034-18-1 Točivé elektrické stroje - Část 18-1: Funkční hodnocení izolačních systémů - Všeobecné návody. 2. Praha, 2011.

[29] ČSN EN 60034-18-21 Točivé elektrické stroje - Část 18-21: Funkční hodnocení izolačních systémů - Zkušební postupy pro vinutá vinutí - Tepelné hodnocení a klasifikace. 2. Praha, 2013.

[30] ČSN EN 60034-18-22 Točivé elektrické stroje - Část 18 - 22: Funkční hodnocení izolačních systémů - Zkušební postupy pro vinutá vinutí - Klasifikace změn a náhrad komponent izolace. Praha, 2001.

[31] ČSN EN 60034-18-34 Točivé elektrické stroje - Část 18-34: Funkční hodnocení izolačních systémů - Zkušební postupy pro tvarovaná vinutí - Hodnocení termomechanické odolnosti izolačních systémů. Praha, 2013.

[32] ČSN EN 60085 Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení. 2. Praha, 2008.

[33] ČSN EN 60505 Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů. 2. Praha, 2014.

[34] ČSN EN 60216-1 Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti - Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky. 2. 2016.

[35] ČSN EN 60034-1 Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti. 2. Praha, 2011.

[36] ČSN CLC/TS 60034-18-33 - Točivé elektrické stroje - Část 18-33: Funkční hodnocení izolačních systémů - Zkušební postupy pro tvarovaná vinutí - Multifaktorové hodnocení podle odolnosti při současném tepelném a elektrickém namáhání. 2012.

[37] ČSN EN 61857-21 ED.3 Elektrické izolační systémy - Postupy pro tepelné hodnocení - Část 21: Zvláštní požadavky na modely pro všeobecné účely - Vinutí z vodičů kruhového průřezu. 3. Praha, 2010.

[38] ČSN EN 61857-1 ED.3 Elektrické izolační systémy - Postupy pro tepelné hodnocení - Část 1: Všeobecné požadavky - Nízké napětí. 3. Praha, 2009.

[39] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje*. Přeložil Břetislav BENDA. Praha: Academia, 1980.

[40] ČSN EN 60216-4-1 Elektroizolační materiály - Vlastnosti tepelné odolnosti - Část 4-1: Pece na stárnutí - Jednokomorové pece. 2006.

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

$\delta$  - ztrátový úhel (míra nedokonalosti dielektrika).

$\operatorname{tg}\delta$  - ztrátový činitel

$E_p$  - elektrická pevnost

$U_p$  - průrazné napětí

$R$  - elektrický odpor

$C$  - elektrická kapacita

$\omega$  - úhlová rychlost

$d$  - průměr

$\varepsilon_r$  - relativní permitivita

$\rho$  - rezistivita

# **Seznam příloh**